

露天煤矿剥离物不同配比表土 替代材料的物理性质

杨卓, 盛世博, 辛建宝, 刘娜, 周国驰

(中煤科工集团沈阳设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: [目的] 探究利用不同配比露天煤矿剥离物制备的表土替代材料物理性质特征, 为露天矿表土替代材料研发及剥离物综合利用提供理论依据。[方法] 以蒙东地区某露天煤矿矿山剥离物为研究对象, 使用环刀法、激光粒度仪及 X 射线荧光光谱测定表土替代材料容重、孔隙度、田间持水量、粒径、比表面积及其组成, 运用灰色关联及主成分分析法分析了物理性质间的关系, 探究影响表土替代材料物理性质的核心指标, 筛选适宜的表土替代材料配比。[结果] ①影响表土替代材料物理性质的两个重要指标分别为容重和田间持水量, 影响表土替代材料持水能力的重要指标是微粒比表面积和总孔隙度; ②心土(钙层土)及细砂的比例增高 30%, 将导致表土替代材料持水能力下降 22%; ③影响表土替代材料容重的重要指标是粒径跨度和 D_{10} ; ④5A(下泥岩段: 上泥岩段: 底板土: 心土: 沙 = 3 : 3 : 4 : 1 : 2) 和 7A(下泥岩段: 上泥岩段: 底板土: 心土: 沙 = 2 : 1 : 2 : 2 : 2) 处理容重和持水能力均较好, 为最优表土替代材料配比。[结论] 通过调节露天煤矿剥离物配比可以有效改善矿山表土替代材料物理性质, 在表土替代材料配置过程中应提高泥岩和底板土的比例并降低钙层土比例来提高持水能力, 露天煤矿剥离物表土替代材料适宜的容重配比为泥岩 : 生土 : 沙 = 2 : 2 : 1。

关键词: 表土替代材料; 物理性质; 容重; 田间持水量; 孔隙度

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)02-0201-07

中图分类号: S157.1, X53

文献参数: 杨卓, 盛世博, 辛建宝, 等. 露天煤矿剥离物不同配比表土替代材料的物理性质[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 201-207. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.027; Yang Zhuo, Sheng Shibo, Xin Jianbao, et al. Physical properties of topsoil substitute materials formed by overburden materials in open-pit coal mine with different ratios [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 201-207.

Physical Properties of Topsoil Substitute Materials Formed by Overburden Materials in Open-pit Coal Mine with Different Ratios

Yang Zhuo, Sheng Shibo, Xin Jianbao, Liu Na, Zhou Guochi

(China Coal Technology Engineering Group Shengyang Engineering Company, Shengyang, Liaoning 110015, China)

Abstract: [Objective] The physical properties of topsoil substitute materials formed by overburden materials in the open-pit coal mine with different ratios were explored, in order to provide a theoretical basis for the development of topsoil substitute materials and comprehensive utilization of stripping materials in open-pit coal mines. [Methods] Taking the stripping material of an open-pit coal mine in Eastern Inner Mongolia as the research object, the bulk density, porosity, field capacity, particle size, specific surface area and composition of topsoil substitute materials were determined by cutting ring method, laser particle size analyzer and X-ray fluorescence spectrometry. The relationships between physical properties of topsoil substitute materials were analyzed by the grey relational analysis and principal component analysis, and the core indexes affecting the physical properties of topsoil substitute materials were analyzed to obtain the most appropriate ratio of topsoil substitute materials. [Results] ① The two important indexes affecting the physical properties of topsoil substitute materials were bulk density and maximum field capacity, while the main indexes influencing

收稿日期: 2020-10-09

修回日期: 2020-12-04

资助项目: 中国煤炭科工集团重点项目“露天煤矿全生命周期生态环境保护与修复治理关键技术的研究”(2018-2-ZD005)

第一作者: 杨卓(1985—), 女(汉族), 黑龙江省伊春市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事土地复垦与生态重建、绿色矿山建设等方面研究。
Email: 32525924@qq.com。

the field capacity were specific surface area and total porosity of particles. ② The increase of the proportion of heart soil (Calcium layer soil) and fine sand by 30%, would lead to the decrease of the field capacity of topsoil substitute material by 22%. ③ Diameter span and D_{10} were the key indexes determining the bulk density of topsoil substitute materials. ④ 5A (lower mudstone : upper mudstone : floor soil : heart soil : sand = 3 : 3 : 4 : 1 : 2) and 7A (lower mudstone : upper mudstone : floor soil : heart soil : sand = 2 : 1 : 2 : 2 : 2) had better bulk density and field capacity, both of them were the optimal substitute material ratio for the topsoil in this test. [Conclusion] The physical properties of topsoil substitute materials can be effectively improved by adjusting the ratio of overburden materials in open-pit coal mines. In the preparation process of topsoil substitute materials, the proportion of mudstone and floor soil should be increased and the proportion of calcium layer soil should be decreased to strengthen the water holding capacity. The suitable bulk density ratio of topsoil substitute materials formed by overburden materials in open-pit coal mines is mudstone : raw soil : sand = 2 : 2 : 1.

Keywords: topsoil substitute material; physical properties; bulk density; field water capacity; porosity

中国露天煤矿产能逐年增加,露天煤矿开发对生态环境的破坏已成为当前面临的重要问题之一。露天煤矿开采对矿区土层结构破坏严重,形成的开挖面和堆垫面远大于原地表面积,导致诸多矿山在生态修复过程中表土匮乏^[1]。同时矿山企业征地难度大,大量的剥离物占用土地资源,剥离物堆砌形成的松散结构易导致地质灾害,极大地限制了露天煤矿的开采。因此亟需研发适宜的剥离物综合利用方式解决露天矿缺失土壤和剥离物占用土地资源的问题^[2]。以剥离物为基质的表土替代材料研发是解决以上问题的最佳途径。表土替代材料的物理性质是研究的基础条件,矿山剥离物多为生土且土壤质地较差,植物生根困难,因此对土壤容重和孔隙度的控制显得尤为重要。目前,露天煤矿多分布于干旱半干旱地区,当地植物生长对水分依赖程度很高,因此表土替代材料的持水性也是重要因素。近年来国内学者^[3-7]对露天煤矿表土替代材料进行了深入研究,况欣宇^[8]在东部草原表土稀缺区进行土壤重构试验,结果表明岩土剥离物的加入可以改良土壤的砂性,荣颖^[9]在研究中表明表土替代材料的筛选和配制需综合考虑剥离物理化性质。有研究表明通过合理搭配剥离物可以改善物理性质^[10-13],通过挑选适宜的剥离物作为基质进行土壤重

构,经过人工整理熟化后可以制备出物理性质良好且无毒害的替代材料^[14-16]。研究虽然取得一些进展,但相关研究中添加的剥离物含量一般较少,同时对不同剥离物搭配比例对表土替代材料物理性质影响方面研究较少,实现剥离物综合利用的意义不大。基于以上研究成果,本研究筛选蒙东地区某表土稀缺的露天煤矿,探究不同剥离物搭配比例对土壤物理性质的影响,筛选适宜配比的表土替代材料,以期为露天矿表土替代材料研发及剥离物综合利用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验概况

试验于 2019 年 6—12 月在土壤实验室进行。露天矿剥离物取自蒙东地区某露天煤矿,采样时间为 2019 年 4 月,经筛选多处取土点后,最终选取 5 处取土点(分别命名为 1—5 号土,1—4 号土位于采坑东帮,5 号土位于采坑西帮)。1 号土取土点高程 874 m(下泥岩段),2 号土取土点高程 914 m(上泥岩段),3 号土(底板土)取土点高程 940 m,4 号土(心土)取土点高程 978 m,5 号土(细砂)取土点高程 982 m。选取土样送至北京市农林科学院植物营养与资源研究所测试,测试结果详见表 1。

表 1 剥离物养分测试结果

剥离物 编号	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	pH 值
1 号	1.680	1.750	18.0	74.5	129.0	4.4	970	8.94
2 号	1.620	1.710	16.2	70.8	115.0	6.5	545	8.82
3 号	0.762	0.525	21.7	13.4	104.0	15.7	770	8.65
4 号	0.690	0.465	19.9	8.1	83.3	17.5	375	8.47
5 号	0.575	0.198	21.6	5.5	38.3	5.7	150	8.81

另外进行重金属镉、铬、镍、铅、砷、铜和锌等检测,检测结果均符合《土壤环境质量农用地土壤污染

风险管控标准(GB15618-2018)》要求,检测结果详见表 2。

表 2 剥离物重金属检测结果

mg/kg

剥离物编号	总 镉	总 铬	总 铅	总 汞	总 砷	总 铜	总 锌	总 镍
1 号	0.132	23.2	19.4	0.167	5.29	11.80	118.0	7.55
2 号	0.150	24.2	19.1	0.109	4.79	12.00	108.0	7.09
3 号	0.047	62.2	23.5	0.055	4.02	28.00	81.7	33.10
4 号	0.039	48.2	14.8	0.036	3.18	19.80	53.6	21.50
5 号	0.012	16.7	9.66	0.033	4.28	6.83	19.6	6.82

1.2 试验方法

1.2.1 盆栽试验方法 本试验利用露天矿剥离物制备表土替代材料,表土替代材料基于正交试验共设计 16 个水平,分别表示为 1A-16A(具体配比见表 3),每个处理 5 个重复。将露天矿剥离物破碎,风干后过 3 mm 筛,各表土替代材料按试验设计配比要求称取,控制各处理总质量为 1 kg,搅拌均匀置于外口径为 15 cm 硬质塑料盆中,控制土壤容重 1.25 g/cm³,加 300 ml 去离子水造墒,室温下放置两周。披碱草种子经 24 h 恒温催芽后,均匀地播种于塑料盆中,播种深度为 1~1.5 cm,每盆 30 粒。将盆栽置于组织培养架中,光照采用 LED 灯进行补充,控制室内恒定温度为 25 ℃,视土壤墒情每 7~10 d 对所有处理进行灌溉,次灌水量控制为每盆 150 ml。6 个月后测定各项物理指标。

表 3 试验样品 16 种配比投入比例情况 %

编号	1 号土 (下泥岩段)	2 号土 (上泥岩段)	3 号土 (底板土)	4 号土 (心土)	5 号土 (细砂)
1A	15.38	23.08	7.69	30.77	23.08
2A	25.00	16.67	16.67	33.33	8.33
3A	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
4A	28.57	28.57	14.29	7.14	21.43
5A	23.08	23.08	30.77	7.69	15.38
6A	33.33	16.67	8.33	25.00	16.67
7A	22.22	11.11	22.22	22.22	22.22
8A	30.77	23.08	23.08	15.38	7.69
9A	23.53	5.88	23.53	23.53	23.53
10A	21.43	28.57	7.14	14.29	28.57
11A	14.29	28.57	28.57	21.43	7.14
12A	8.33	16.67	33.33	16.67	25.00
13A	7.14	28.57	21.43	28.57	14.29
14A	23.08	7.69	23.08	23.08	23.08
15A	7.69	23.08	15.38	23.08	30.77
16A	16.67	16.67	25.00	8.33	33.33

1.2.2 指标测定 本试验主要测定的物理指标包括总孔隙度、毛管孔隙度、土壤容重、田间持水量、土壤微团聚体(D₁₀, D₅₀, D₉₀, 跨度及微粒比表面积)。

土壤孔隙度及毛管孔隙度测定采用环刀法测定,土壤容重、田间持水量测定参照行标《土壤容重的测定(NY/T1121.4-2006)》和《土壤田间持水量的测定:环刀法(NY/T1121.22-2010)》测定,土壤微团聚体 D₁₀, D₅₀, D₉₀ 和比表面积测定采用 Bettersize 2600 激光粒度分布仪进行测定。

跨度(span)是衡量粒径区间分布的重要指标,其计算方式为:

$$\text{span} = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (1)$$

式中: D₁₀ 为颗粒累积分布为 10% 的粒径; D₅₀ 为中值粒径,是颗粒累积分布为 50% 的粒径; D₉₀ 为颗粒累积分布为 90% 的粒径。

1.3 数据分析方法

试验数据的相关性处理选用 Excel 进行处理。本试验研究选用灰色关联分析法对数据进行处理,灰色关联分析法是基于数据整体排列方式的几何相似性来判断数据间的关联程度,数据序列的相似程度高则几何相似度高,序列间关联度越大,反之则关联度越小。计算公式为:

$$Y[X_0(k), x_i(k)] = \frac{x_{\min} + \rho x_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho x_{\max}} \quad (2)$$

式中: Δ_{oi}(k) 为各比较数列 x_i 曲线上的每一个点与参考数列 x₀ 曲线上的每一个点的绝对差值; x_{min} 和 x_{max} 是比较序列和参考序列的绝对差值的最小值和最大值; ρ 为分辨系数,本次分析取 0.5。

2 结果与分析

2.1 表土替代材料物理性质特征分析

对 16 组处理总孔隙度、毛管孔隙度、容重、田间持水量、D₁₀, D₅₀, D₉₀, 跨度、比表面积等指标进行测定,各测定结果平均值详见表 4。

表 4 表土替代材料物理指标

编号	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	田间持水量/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	D_{10}	D_{50}	D_{90}	跨度	比表面积
1A	46.98	29.83	1.43	305.10	2.135	12.5	66.16	5.12	399.2
2A	49.41	31.31	1.34	340.99	2.081	12.06	59.38	4.75	410.1
3A	48.54	26.53	1.31	328.11	1.998	11.23	57.19	4.91	431.6
4A	49.51	30.66	1.42	341.43	2.037	11.52	56.85	4.76	422.3
5A	51.22	29.72	1.38	372.52	1.908	9.938	50.17	4.86	459.4
6A	52.15	33.55	1.32	368.54	2.073	11.63	60.3	5.01	415.4
7A	49.88	29.43	1.32	366.29	1.998	10.42	49.99	4.61	439.1
8A	50.27	32.49	1.46	373.77	1.963	10.17	46.14	4.34	448.5
9A	46.45	30.64	1.52	326.83	2.042	10.81	57.32	5.11	426.9
10A	54.53	33.82	1.40	321.02	2.151	11.9	58.93	4.77	401.5
11A	45.40	26.73	1.43	359.93	1.98	10.46	53.34	4.91	440.6
12A	39.50	29.22	1.45	321.20	1.967	10.76	58.41	5.25	439.9
13A	50.08	29.45	1.42	330.60	1.932	10.45	52.05	4.80	449.9
14A	47.74	29.45	1.43	319.92	1.998	10.65	52.46	4.74	437.6
15A	45.64	28.48	1.39	307.28	2.246	12.28	62.79	4.93	387
16A	46.72	27.58	1.41	314.59	2.014	10.49	56.34	5.18	433.8

为了判定各指标间联系,首先将各物理性质指标进行初值化,随后将各处理物理性质指标进行聚类分析,结果如图 1 所示。由图 1 可以看出,各物理性质间存在 5 级聚类的层级,第 1 级主要归纳了总孔隙度和毛管孔隙度,容重,跨度和 D_{10} ,比表面积和田间持水量, D_{90} 和 D_{50} 间存在类似关系,第 2 级主要归纳了容重和跨度及 D_{10} 存在联系;第 3 级主要归纳了孔隙度与容重存在联系。其余两级关系逐渐微弱。可以从物理指标的特性看出,总孔隙度、毛管孔隙度、容重、田间持水量为宏观指标;跨度, D_{10} , 比表面积, D_{90} 和 D_{50} 为土壤组成的微观指标。结合分析结果可以看出,跨度和 D_{10} 是影响表土替代材料容重的重要因素,比表面积是影响表土替代材料田间持水量的重要因素。

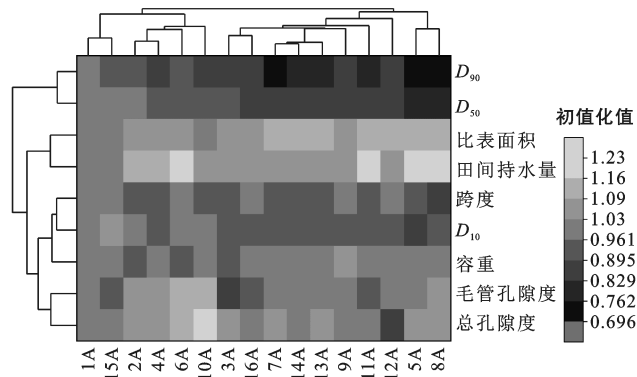


图 1 不同表土替代材料物理指标聚类热图

为了探究影响表土替代材料物理性质的主要因素,采用主成分分析法对各数据进行降维处理,处理结果公共因子总方差详见表 5。前 3 个公共因子的特

征值较高,累计贡献率达 85.466%,表明提取的公共因子能够较好的描述表土替代材料物理性质,取成分 1,成分 2 和成分 3 作为公共因子。

表 5 公共因子解释的总方差

成分	特征值	方差贡献/%	累积贡献/%
1	4.215	46.831	46.831
2	2.368	26.310	73.141
3	1.109	12.324	85.466
4	0.667	7.411	92.877
5	0.372	4.133	97.010
6	0.173	1.919	98.928
7	0.094	1.040	99.968
8	0.003	0.029	99.997
9	0.000	0.003	100.000

通过斜交旋转得到物理性质的主要因子旋转成分矩阵详见表 6。对物理性质有影响的主要有 3 个主成分,第一主成分特征值为 4.215,贡献率占 46.831%,此主成分中荷载最大的因子为 D_{90} (0.955),其次为 D_{50} (0.943),再次为 D_{10} (0.914)。第二主成分特征值为 2.368,贡献率占 26.310%,此主成分中荷载最大的因子为田间持水量 (0.886),其次为比表面积 (0.774),第三主成分特征值为 1.109,贡献率占 12.325%,此主成分中荷载最大的因子为土壤容重 (0.839)。从分析结果可知 D_{90} , D_{50} , D_{10} , 田间持水量,比表面积和土壤容重可以表达该组数据 85% 以上的数据,说明选取这些因子可以代表本次数据 85% 以上的信息量,说明土壤总孔隙度和毛管孔隙度指标表达的信息量较

小,其他指标仅田间持水量和土壤容重为宏观指标,因此本文选取田间持水量和土壤容重进行深入分析,

以微观指标进行辅助分析,以期对表土替代材料制备过程中物理性质控制提供理论支持。

表 6 旋转成分矩阵荷载系数

项目	总孔隙度	毛管孔隙度	土壤容重	田间持水量	D_{10}	D_{50}	D_{90}	跨度	比表面积
主成分 1	-0.117	0.105	-0.249	-0.594	0.914	0.943	0.955	0.468	-0.958
主成分 2	0.488	0.322	-0.408	0.886	0.208	0.245	-0.119	-0.645	0.774
主成分 3	-0.010	0.323	0.839	-0.358	0.196	-0.030	-0.160	-0.308	-0.113

2.2 表土替代材料田间持水量的特征

测定各物理指标结果详见表 4。田间持水量是土壤物理性质中一项的重要因素,它可以直接反应表土替代材料对水分的涵养能力。本文选取田间持水量为参考序列 Y_0 ,选取总孔隙度、毛管孔隙度、容重、 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、跨度、比表面积作为比较数列 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 ,进行灰色关联计算结果详见表 7。由表 7 可以看出,比表面积与田间持水量的

关联度最大,关联度为 0.834;其次为总孔隙度,关联度为 0.786。该结论与聚类分析结果一致,从分析结果可以看出,比表面积与持水能力息息相关,主要原因是颗粒比表面积越大,接纳水分子的能力越强,其涵养水源的能力越强。其次影响表土替代材料的持水量的重要指标是总孔隙度,其总孔隙度越大,表土替代材料单位时间可以容纳的水分越大,可以提供更多水分子与表土替代材料的接触机会,提升保水能力。

表 7 物理指标对田间持水量的灰色关联分析结果

项目	总孔隙度(X_1)	毛管孔隙度(X_2)	土壤容重(X_3)	D_{10} (X_4)	D_{50} (X_5)	D_{90} (X_6)	跨度(X_7)	比表面积(X_8)
关联度	0.786	0.744	0.740	0.670	0.595	0.554	0.686	0.834

由表 4 可以看出,田间持水量最好的配比形式为 5A 和 8A 两组,其次持水性较好的配比为 6A 和 7A 两组处理。5A 和 8A 的比表面积数值是较大的,二者的共同点是心土及细砂添加量(均为 23.08%)最小。基于此原则反观心土及细砂添加量(均为 53.85%)较多的 1A 和 15A 配比,其田间持水量较低。因此可以看出,心土及细砂的比例增高约 30%,将导致表土替代材料持水能力下降 22%。为了探究心土加入对表土替代材料持水能力削弱的的原因,对所取剥离物进行 X 射线荧光光谱分析(XRF),定性测试其元素组成,因为细砂主要由二氧化硅构成,所以未对其进行检测,检测结果详见表 8。根据检测结果可以看出,组成剥离物的主要元素为硅元素、铝元素和铁元素,钠元素和镁元素 4 号土含量最高,差异最大的元素为钙元素和铁元素。4 号土钙元素含量是 1,2,3 号土的 3~4 倍,铁元素是 1,2,3 号土的 1/2~1/3。从成分分析结果可以看出,4 号土为钙层土。根据以上的分析,心土的比例增高将导致表土替代材料持水能力下降,从成分分析结果可以看出,由于该露天矿心土钙化严重,主要是淋溶产生碳酸钙淀积。钙化较高的土壤多以粉末状形式存在,遇水迅速饱和和结块,涵养水源能力较弱。由于试验选取的露天矿处

于半干旱区,地形多以草原为主,土壤钙化属于常见规律,因此在配置表土替代材料过程中应控制钙化土的施放量,以提高表土替代材料持水能力。

表 8 X 射线荧光光谱分析测试结果 %

元素	1 号土	2 号土	3 号土	4 号土
Na	0.594	0.721	0.681	1.054
Mg	0.97	0.948	2.33	2.52
Al	20.676	22.574	17.949	15.437
Si	54.459	56.055	60.378	61.149
P	1.378	1.877	1.136	0.974
K	2.715	2.704	3.581	3.518
Ca	1.675	1.497	2.069	7.801
Ti	0.933	0.953	1.028	1.069
Mn	0.491	0.383	0.247	0.102
Fe	15.388	11.65	10.355	5.887

注:所列元素为比例大于 0.3%的元素,其他含量较低元素未列入。

2.3 表土替代材料物容重的特征

对物理指标间关联性进行分析,选取容重为参考序列 Y_0 ,选取总孔隙度、毛管孔隙度、田间持水量、 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、跨度、比表面积作为比较数列 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 ,计算方法同上,计算结果详见表 9。

表 9 表土替代材料物理指标对容重的灰色关联分析

项目	总孔隙度(X_1)	毛管孔隙度(X_2)	田间持水量(X_3)	D_{10} (X_4)	D_{50} (X_5)	D_{90} (X_6)	跨度(X_7)	比表面积(X_8)
关联度	0.711	0.773	0.651	0.743	0.662	0.604	0.790	0.680

由表 9 可以看出,各影响因子关联度大于 0.7 的有 4 组,跨度与容重的关联度最大,为 0.790;其次为毛管孔隙度,关联度为 0.773; D_{10} 和总孔隙度对其关联度分别为 0.743,0.711。土壤容重是衡量土壤性质的重要指标,就试验方法来看,土壤容重是计算单位体积内的质量,而孔隙度是计算体积比例,二者从两个角度反馈土壤紧实程度,因此其关联性较大。从微观角度看,根据测试结果 D_{10} 一般为 $2 \mu\text{m}$ 左右,小于 $2 \mu\text{m}$ 的属于黏粒,黏粒对土壤容重影响较大,由于黏粒主要由原生矿物、次生矿物组成,其孔隙很小,吸附性强,极易形成密闭空间,因此黏粒越多土壤容重会越高。跨度是表土替代材料微粒径分布的重要指标,其与土壤容重关系最为密切,从微观角度来看,粒径跨度越大表明土壤粒径组越丰富,颗粒级配越合理,如果表土替代材料粒径均集中于黏粒,那么其结块程度极为严重,因此粒径跨度越大,土壤容重越趋于合理。基于关联性分析结果,选取与土壤容重关联性较大的孔隙度进行对比分析(如图 2 所示),结果表明不同比例混合的表土替代材料容重和孔隙度差异明显,不同配比表土替代材料容重总体分布于 $1.31 \sim 1.52 \text{ g/cm}^3$ 。

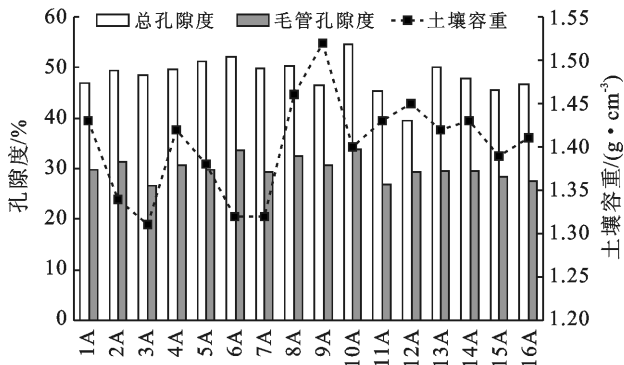


图 2 表土替代材料孔隙度与容重的关系

根据柴华^[17]的研究结果可以看出,我国土壤容重平均值的变化范围为 $0.93 \sim 1.41 \text{ g/cm}^3$,中位值为 1.32 g/cm^3 ,初育土的平均容重及中值容重分别为 1.39 和 1.40 g/cm^3 ,因此 1A,8A,9A,11A,12A,13A,14A 等容重过大的配比不适合作为表土替代材料。有研究^[18]表明,大部分土壤总孔隙度在 $40\% \sim 60\%$ 范围内,但土壤总孔隙度在 50% 左右,其中非毛管孔隙占 $20\% \sim 40\%$ 时,土壤通气性、透水性和持水能力比较

协调。因此本次研究孔隙度满足要求的处理仅为 3A,5A 和 7A 处理。3A 处理为容重最趋近于土壤平均容重,其次为 6A 处理和 7A 处理,这 3 种配比接近于国内土壤容重的平均水平,为本试验容重较好的处理,综合容重和孔隙度数据可以看出,3A 和 7A 处理为本次试验优质处理。

3 讨论

3.1 表土替代材料田间持水量的影响因素

研究区位于干旱区,表土替代材料田间持水量是其能否应用于矿山复垦的重要因素,研究证明表土替代材料的持水能力主要与颗粒的比表面积大小有关系,王修康等^[19]在平原区土壤持水量研究过程中发现,黏粒含量和比表面积是影响土壤持水量的重要因素,说明本试验配置的表土替代材料与平原区土壤水分特征存在相似性。因此可以通过添加适量比表面积大的颗粒物改善表土替代材料持水能力^[20]。本研究发现可以通过降低钙层土和细砂的含量来增加表土替代材料田间持水量,彭海英等^[21]在内蒙古草原土壤研究过程中发现,钙积层由于其黏重的特性可以对干旱区草原土壤水分涵养提供帮助,该结论与本试验研究结果存在矛盾,可能原因为钙层土其本身具有粘重的特性,在其含量较多时可以阻隔水分渗漏,但由于掺入比例较少(最高配比为 33.33%),均匀搅拌后,其黏重的特性在局部形成板结块,反而加剧了水分流失。

3.2 表土替代材料容重的影响因素

容重是表土替代材料物理性质的重要指标,本研究发现, D_{10} ,跨度和总孔隙度是影响表土替代材料土壤容重的 3 个重要因素,付标等在草地研究表明,随着容重增大,土壤孔隙度存在逐渐减小的趋势^[22],但从本试验结果来看,不同处理土壤容重值从初始的 1.25 g/cm^3 均有增加,但不同处理存在容重和孔隙度同时大于另一处理的情况。出现这种情况的原因可能是土壤的容重(D)与孔隙度(P)存在换算关系 [$P(\%) = (1 - D/\rho) \times 100$],不同比例配置的表土替代材料比重(ρ)不同,因此对比表土替代材料间容重与孔隙度的变化规律没事实意义,同时这也可能是导致表土替代材料容重与总孔隙度关联度并不高的原因。由于泥岩水稳性较差,遇水会发生崩解及软化^[23-24],因此在遇水后泥岩颗粒的软化重组导致表土

替代材料最终容重增大,从而导致表土替代材料容重从初始控制的 1.25 g/cm^3 变化为最终的容重值。

4 结论

由主成分分析结果可知,影响表土替代材料物理性质的两个重要的宏观衡量指标分别为容重和田间持水量,由灰色关联分析结果可知 D_{10} 和跨度是影响容重的重要微观因素,比表面积是影响田间持水量的重要微观因素。通过田间持水量数据可以得出,心土(钙层土)及细砂的比例增高 30%,将导致表土替代材料持水能力下降 22%。

3A(下泥岩段:上泥岩段:底板土:心土:沙=1:1:1:1:1)和 7A(下泥岩段:上泥岩段:底板土:心土:沙=2:1:2:2:2)处理为本次试验容重最好的配比,5A(下泥岩段:上泥岩段:底板土:心土:沙=3:3:4:1:2)和 8A(下泥岩段:上泥岩段:底板土:心土:沙=4:3:3:2:1)处理为本次试验持水能力最好的配比。因为 3A 处理持水能力较差,8A 处理容重较大,综合考量不同表土替代材料容重与田间持水量,所以 5A 和 7A 处理为本次试验最优表土替代材料配比。

[参 考 文 献]

- [1] Sun Zehang, Xie Xiande, Wang Ping, et al. Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: A case study from a polymetallic mine in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639(15): 217-227.
- [2] 杨卓,盛世博,刘娜,等.露天煤矿剥离物制备表土替代材料的影响因素[J].*露天采矿技术*, 2020, 35(5): 47-50.
- [3] 况欣宇,曹银贵,罗古拜,等.基于不同重构土壤材料配比的草木樨生物量差异分析[J].*农业资源与环境学报*, 2019, 36(4): 453-461.
- [4] 荣颖.西部露天矿区海绵营养土及其应用方法与作用机理的研究[D].北京:中国矿业大学(北京), 2018.
- [5] 涂永成.干旱矿区复合微生物菌肥土壤改良试验研究[D].江苏 徐州:中国矿业大学, 2015.
- [6] 刘雪冉,胡振琪,许涛,等.露天煤矿表土替代材料研究综述[J].*中国矿业*, 2017, 26(3): 81-85.
- [7] 王舒菲,曹银贵,罗古拜,等.黄土露天矿区重构土壤典型物理性质差异及对植被生长状况的影响[J].*农业资源与环境学报*, 2019, 36(3): 344-354.
- [8] 况欣宇.基于采矿固废的东部草原表土稀缺矿区土壤重构试验研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2020.
- [9] 荣颖,胡振琪,杜玉玺,等.露天矿区土壤基质改良材料研究进展[J].*金属矿山*, 2018(2): 164-171.
- [10] 郭航,韩霁昌,张扬,等.基于拉曼光谱研究砒砂岩与沙复配土的胶结作用力[J].*激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 436-442.
- [11] 汪怡珂,罗昔联,花东文,等.毛乌素沙地复配土壤水分特征曲线模型筛选研究[J].*干旱区资源与环境*, 2019, 33(6): 167-173.
- [12] Cao Yingui, Wang Jinman, Bai Zhongke, et al. Differentiation and mechanisms on physical properties of reconstructed soils on open-cast mine dump of loess area [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(8): 6367-6380.
- [13] Feng Yu, Wang Jinman, Bai Zhongke, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191(4): 12-25.
- [14] Raj K Shrestha, Rattan La. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation [J]. *Geoderma*, 2010, 161(3): 168-176.
- [15] Fellet G, Marchiol L, Delle Vedove G, et al. Application of biochar on mine tailings: Effects and perspectives for land reclamation [J]. *Chemosphere*, 2011, 83(9): 1262-1267.
- [16] Stephane Boyer, Stephen D Wratten. The potential of earthworms to restore ecosystem services after open-cast mining a review [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2009, 11(3): 196-203.
- [17] 柴华,何念鹏.中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J].*生态学报*, 2016, 36(13): 3903-3910.
- [18] 朱万泽,盛哲良,舒树森.川西亚高山次生林恢复过程中土壤物理性质及水源涵养效应[J].*水土保持学报*, 2019, 33(6): 205-212.
- [19] 王修康,戚兴超,刘艳丽,等.泰山山前平原 3 种土地利用方式下土壤结构特征及其对土壤持水性的影响[J].*自然资源学报*, 2018, 33(1): 63-74.
- [20] 郑存德,程岩,张明明.质地对土壤物理性质的影响及调节研究[J].*干旱区资源与环境*, 2014, 28(4): 174-178.
- [21] 彭海英,童绍玉,李小雁.内蒙古典型草原土壤及其水文过程对灌丛化的响应[J].*自然资源学报*, 2017, 32(4): 642-653.
- [22] 付标,齐雁冰,常庆瑞.不同植被重建管理方式对沙质草地土壤及植被性质的影响[J].*草地学报*, 2015, 23(1): 47-54.
- [23] 李桂臣,孙长伦,何锦涛,等.软弱泥岩遇水强度弱化特性宏观模拟研究[J].*中国矿业大学学报*, 2019, 48(5): 935-942.
- [24] 杨成祥,宋磊博,王刚,等. CT 实时观察下泥岩遇水软化过程的机理[J].*东北大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(10): 1461-1465.